

Evaluierung des TanDEM-X Geländemodells mittels kinematischem GPS

Bimin Zheng¹, Volker Schwieger¹, Detlev Kosmann²

¹Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen
Universität Stuttgart
Geschwister-Scholl Str.24D
70174 Stuttgart
bimin.zheng@iagb.uni-stuttgart.de
volker.schwieger@iagb.uni-stuttgart.de

²Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum
Oberpfaffenhofen
82230 Weßling
detlev.kosmann@dlr.de

1 Motivation

Ein neues, weltweites und hochgenaues, digitales Höhenmodell (DEM) wird in der nahen Zukunft im Rahmen der Satellitenmission TanDEM-X generiert. 2007 wurde der erste Satellit TerraSAR-X in die Umlaufbahn gebracht. Der zweite Satellit der TanDEM-X Mission wurde in der Nacht von Sonntag 20.06.2010 auf Montag 21.06.2010 gestartet.

Die Frage, die sich für das DLR ergibt, ist die Evaluierung der erwarteten Genauigkeit von bis zu 2m relativ in der Höhe. Verschiedene Methoden wie die Nutzung von ICESAT-Daten wurden vorgeschlagen. Huber et al. (2009) und Kosmann et al. (2010) geben Hintergrundinformationen bezüglich der TanDEM-X Mission, des resultierenden digitalen Höhenmodells (DEM) und der verschiedenen Evaluierungsmethoden. Diese Veröffentlichung wird sich mit der Evaluierung unter Nutzung von kinematischen GPS Tracks beschäftigen. Das Genauigkeitsniveau der GPS Tracks muss höher als die erwartete DEM-Genauigkeit sein. In Schwieger et al. (2009) wurde die Entscheidung, Precise Point Positioning (PPP) als kinematische Evaluierungsmethode zu benutzen, begründet. Dort und in Schweitzer et al. (2010) wurden erste Ergebnisse präsentiert. Diese Veröffentlichung konzentriert sich auf die Auswertung der ersten zehn ausgewerteten weltweit verteilten kinematischen GPS Tracks.

2 TanDEM-X Mission

Die TanDEM-X Mission ist das erste Satellitenvorhaben, bei dem zwei Satelliten in einer fast identischen Orbitkonfiguration die Erde umkreisen. Die beiden nahezu baugleichen Satelliten tasten mit einem aktiven Radarsystem die Erde komplett ab. Mittels der dabei gewonnenen Daten wird es möglich sein, die komplette Erdoberfläche 3-dimensional zu erfassen. Das Prinzip der Radarinterferometrie ist dabei der Schlüssel zur Erstellung dieses einzigartigen globalen Höhen Datensatzes – dem primären Missionsziel.

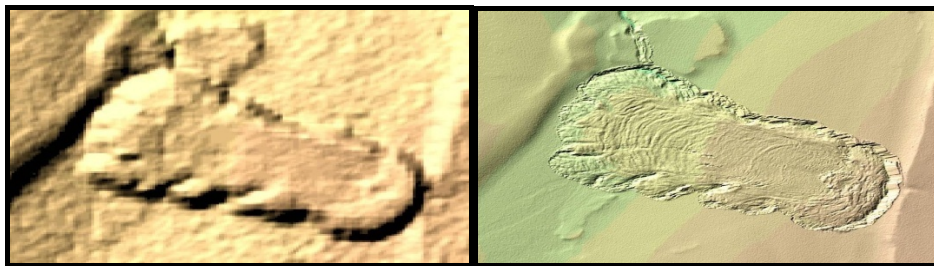


Abb. 1: DEM Auflösungsverbesserung von SRTM nach TanDEM-X

Die SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) Ergebnisse des Jahres 2000 lieferten eine abgeschätzte Genauigkeit von etwa 6 bis 10m mit einer Auflösung von jeweils etwa 30x30m oder 90x90m (Rodriguez et al., 2005). Ausgehend von den guten Ergebnissen wurde TanDEM-X 2006 beschlossen. Am 30. August 2006 unterzeichneten das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und die Astrium GmbH die Kooperationsvereinbarung sowie den Vertrag für den Bau des Satelliten TanDEM-X. Damit wurde die erfolgreiche Zusammenarbeit in öffentlich-privater Partnerschaft zwischen DLR und Industrie aus dem Projekt TerraSAR-X fortgeführt.

Das DLR hat die Gesamtprojektleitung von TanDEM-X. Es ist außerdem verantwortlich für den Aufbau der Bodeninfrastruktur. Die Steuerung der beiden Satelliten, Datenempfang, -archivierung und -verteilung sowie die Generierung und Kalibrierung des globalen Geländemodells und die Unterstützung der wissenschaftlichen Nutzer übernehmen das Raumfahrt-Kontrollzentrum des DLR, das DLR-Institut für Methodik der Fernerkundung, das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) sowie das DLR-Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme. Das DLR ist zudem für den fünfjährigen Betrieb des Satelliten zuständig. Die Astrium GmbH war verantwortlich für Entwicklung, Bau und Start von TanDEM-X.

Beide Seiten finanzieren den knapp 85 Millionen Euro teuren Satelliten gemeinschaftlich in einer so genannten öffentlich-privaten Partnerschaft. Die Nutzung

der Daten für wissenschaftliche Zwecke liegt in Händen des DLR-Instituts für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme. Die kommerzielle Vermarktung übernimmt die Firma Infoterra GmbH in Friedrichshafen, eine hundertprozentige Tochtergesellschaft von Astrium. Im Gegenzug beteiligt sich das Unternehmen umsatzabhängig an den Betriebskosten des Satelliten.

Deutschland wird mit diesem digitalen Geländemodell der Erde über ein weltweit einmaliges Datenprodukt verfügen, welches - neben vielen wissenschaftlichen Anwendungsmöglichkeiten - von Einrichtungen wie dem DLR-Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation (ZKI) sowie von Programmen und Initiativen wie GMES (Global Monitoring for Environment and Security) und GE-OSS (Global Earth Observation System of Systems) aber auch für sicherheitsrelevanten Kooperationsabkommen genutzt werden kann.

2.1 TanDEM-X und TerraSar-X

Die Mission besteht aus dem gemeinsamen Betrieb der beiden deutschen Radarsatelliten TerraSAR-X und TanDEM-X (TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement). Als Nutzlast haben beide Satelliten ein aktives Radarsystem an Bord, das in verschiedenen Modi betrieben wird, um Aufnahmen mit unterschiedlichen Streifenbreiten, Auflösungen und Polarisationen zu ermöglichen. Die Mission bietet dadurch Beobachtungsmöglichkeiten, die bisher aus dem All nicht verfügbar waren.

Mit dem erfolgreichen Start von TerraSAR-X am 15. Juni 2007 vom russischen Kosmodrom Baikonur (Kasachstan) wurde der Grundstein für die gemeinsame Mission geschaffen. Nahezu drei Jahre später wurde am 21. Juni zur exakt gleichen Zeit der Partnersatellit TanDEM-X mit einer Dnepr Rakete, einer umgebauten russischen Interkontinentalrakete (SS18), gestartet.

Ein Netz aus Bodenstationen (Inuvik-Kanada, O'Higgins-Antarktis, Kiruna-Schweden, Neustrelitz-Deutschland) garantiert die weltweite Möglichkeit zum Daten herunterladen.



Abb. 2: Start der Dnepr Rakete

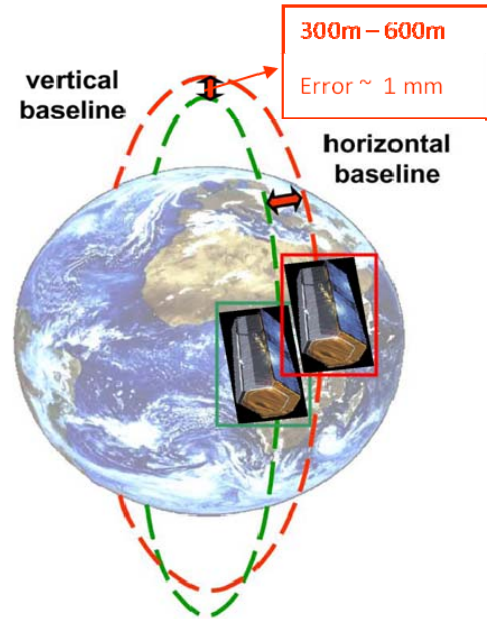


Abb. 3: Helix Orbit Konfiguration

Die 1,3 Tonnen schweren und fünf Meter hohen Satelliten umrunden die Erde in einer Höhe von 514 Kilometern auf einer polaren Umlaufbahn. Mit ihren aktiven Antennen liefern sie unabhängig von Wetterbedingungen, Wolkenbedeckung und Tageslicht Radardaten mit einer Auflösung von bis zu einem Meter. Es ist möglich, den Blickwinkel in einem Schwenkbereich zwischen 20 und 60 Grad senkrecht zur Flugrichtung elektrisch zu verstellen, ohne den Satelliten selbst bewegen zu müssen. Neben dem primären Missionsziel (globales DEM) werden viele Anwendungen. z.B. Exploration, Kartographie und Hydrologie unterstützt.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die verschiedenen Phasen der TanDEM-X Mission auf. Zur Zeit befindet sich der Satellit in der „Commissioning Phase“.

Tab. 1: Phasen der TanDEM-X Mission

Phase	Dauer	Aufgabe
Commissioning Phase	6 Monate	Kalibrierung, Validierung
Betriebs Phase 1	12 Monate	1. globale Abdeckung, Basislinie 200m
Betriebs Phase 2	12 Monate	2. globale Abdeckung, Basislinie 500m
Betriebs Phase 3	6 Monate	Aufnahmen in schwierigen Gebieten
Phase 4	Fortsetzung	Weitere Basislinien, Spezielle Produkte

2.2 Die TanDEM-X Produkte

Es stehen zwei Produkttypen zur Verfügung:

- Radarprodukte,
- Digitale Geländemodelle.

Die Radarprodukte stehen in den verschiedenen Aufnahmemodi zur Verfügung. Der Nutzer kann Produkte verschiedener Verarbeitungsstufen auswählen. Als Grundlagenprodukt steht das komplexe Radarprodukt zur Verfügung, am Ende der Verarbeitungskette kann ein geokodiertes Produkt bestellt werden. Alle Verarbeitungsstufen sind für die verschiedenen Aufnahmemodi verfügbar.

Tab. 2: Radar Aufnahmemodi

Mode	Streifenbreite (km x km)	Azimuth Auflösung (m)	Range Auflösung (m)
Scan SAR (SC)	100 x 150	18,5	1,7 - 3,5
Stripmap (SM)	15 x 50	3,3	1,7 - 3,5
Spotlight (SL)	10 x 10	1,7	1,5- 3,5
High Res. Spotlight (HS)	5 x 10	1,1	1,5 - 3,5

Diese Produkte stehen für beide Satelliten zur Verfügung. Die Produktparameter und die Qualität sind identisch. Damit wird eine deutlich Verbesserung der temporalen Auflösung erreicht.

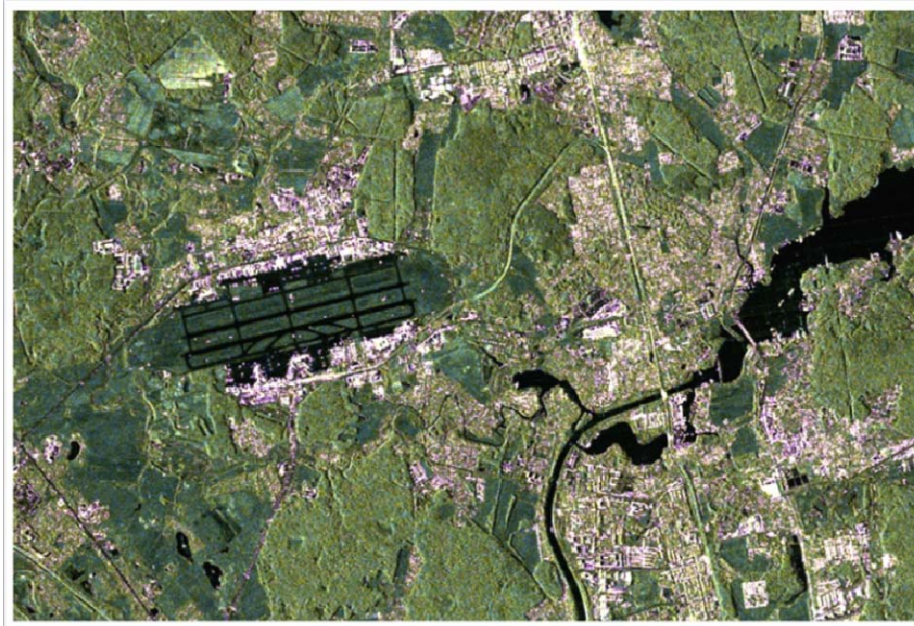


Abb. 4: Eines der ersten TanDEM-X SAR Produkte

Abb. 4 ist eines der ersten TanDEM-X SAR Produkte. Es zeigt den Flughafen Moskau-Sheremetyevo, etwa 30 Kilometer nordwestlich von Moskau. Gut erkennbar sind die beiden Start- und Landebahnen. Da die ebenen Betonflächen die Radarstrahlen vom Satelliten aus dem All reflektieren, sind die Bahnen als schwarze Linien zu sehen. Im Norden von Moskau liegen außerdem große Stauseen wie das Pirogovskoye Reservoir und das Uchinskoye Reservoir.

Durch die Nutzung beider Satelliten sind Monitoring-Anwendungen über einem mehrjährigen Zeitraum möglich. Abb. 5 zeigt ein Beispiel mit einer Kombination aus den ersten TerraSAR-X Daten mit einem aktuellen TanDEM-X Produkt. Die unterschiedlichen Farben zeigen die Veränderungen auf der Landoberfläche. Im roten und grünen Randbereich sind die Aufnahmegebiete nicht deckungsgleich. In Abb. 5 sind diese Bereiche entsprechend beschriftet, da es sich um einen schwarz-weiß-Druck handelt.

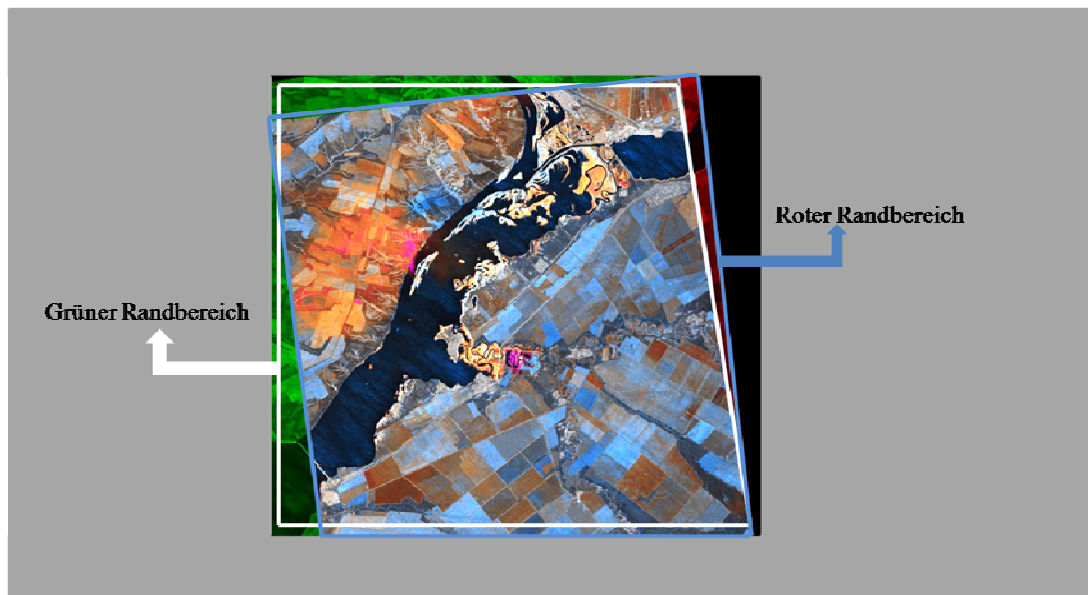


Abb. 5: Multitemporales TerraSAR und TanDEM-X Bild

2.3 Das TanDEM-X Höhenmodell

Die einzigartige Orbitkonfiguration der beiden Satelliten, die auf einer sogenannten Helix Bahn (Abb. 3) in einem Abstand von nur wenigen hundert Metern die Erde umkreisen, garantiert eine präzise interferometrische Verarbeitung. Ein Satellit sendet einen Radarimpuls aus, der von beiden nahezu gleichzeitig aufgenommen wird. Dadurch wird eine sehr hohe Kohärenz beider Datensätze erreicht, so dass eine der Grundvoraussetzungen für eine interferometrische DEM Erstellung erfüllt ist. Durch geringe Veränderungen der Basislinie lässt sich die

Höhengenaugkeit beeinflussen. In Tab. 3 sind die zu spezifizierenden Genauigkeiten angegeben. Eine kürzere Basislinie reduziert die Höhengenaugkeit.

Tab. 3: Genauigkeitsparameter und Auflösung des DEM

Parameter	Wert	Bemerkung
Absolute vertikale Genauigkeit	10 m	90% linearer Fehler
Horizontale Genauigkeit	10 m	90% Fehlerkreis
Relative vertikale Genauigkeit	2 m (Hang < 20 Grad)	90% linearer Fehler
Pixelgröße in geogr. Länge	0,4''	12,4 m
Pixelgröße in geogr. Breite	0,4'', zwischen 0-50 Grad	11,2 m
	... 4,0 '' zwischen 85-90 Grad	... 5,4 m
Format	GeoTIFF	

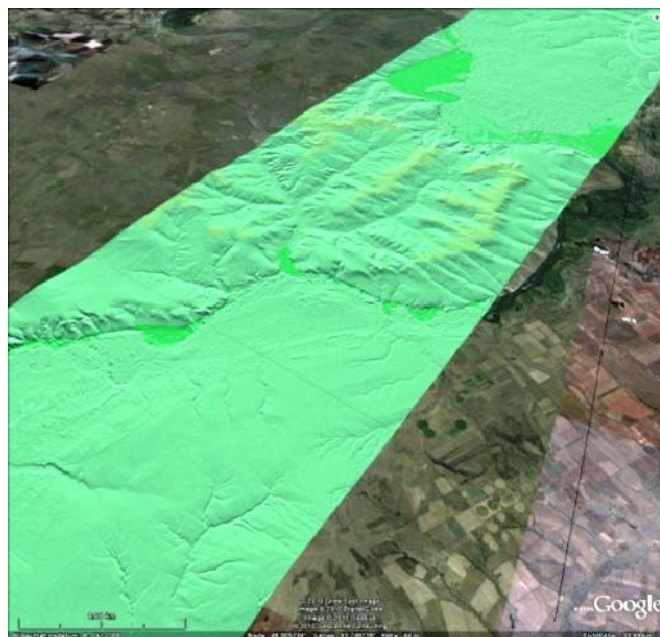


Abb. 6: TanDEM-X Höhenmodell

Aus den ersten aufgenommen Szenen wurden bereits DEMs erstellt. In einer Überlagerung mit Google Earth ist ein Gebiet an der Wolga zu erkennen (siehe Abb. 6). Zu dem DEM existiert das entsprechende Amplitudenbild für das exakt gleiche Gebiet als SAR Produkt.

Für die Validierung der Höhenwerte werden verschiedene Referenzdaten genutzt. Weltweit werden die Höhenwerte des Altimeters der Satellitenmission IceSAT eingesetzt. In wenigen speziellen Gebieten sind Laser DEMs vorhanden. Als Punktreferenz stehen außerdem Höhenprofile von mehreren tausend Kilometern kinematischer GPS-Track Messungen zur Verfügung. In allen Kontinenten wurden entsprechende Tracks gefahren und deren Daten ausgewertet. Dieser Beitrag beschäftigt sich im Wesentlichen mit dieser Methodik.

2.4 Wissenschaftliche Nutzung

Die wissenschaftliche Nutzung wird vom DLR Institut für Hochfrequenztechnik und Radartechnologie organisiert. Eine webbasierte Nutzerschnittstelle (<http://tandemx-science.dlr.de>) steht seit dem 13. Juli 2010 zur Verfügung. Dort können sich Wissenschaftler registrieren und ihre Proposals einreichen. Es ist bis zum 31. Oktober möglich, einen Nutzungsantrag zu stellen.

Die Produkte stehen entsprechend der Missionszyklen zur Verfügung; zu Beginn der Mission nur die typischen SAR Produkte. Es ist geplant, dass nach einem Jahr das erste weltweite DEM genutzt werden kann.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit im Rahmen der Validierung und Kalibrierung Daten aus der Mission zu bekommen.

3 Kinematisches GNSS und PPP

In der TanDEM-X Mission sollen ein absoluter Höhenfehler von 10m und ein relativer Höhenfehler von 2m für 90% der Daten erreicht werden (Tab. 5). Zur Evaluierung mittels kinematischen GNSS beziehungsweise GPS werden die Daten weltweit erhoben. Um sich für eine kinematische GPS bzw. GNSS-Methode zur Evaluierung des TanDEM-X Höhenmodells entscheiden zu können, muss man sich zunächst mit den existierenden Möglichkeiten vertraut machen. In Tab. 4 werden verschiedene mögliche Genauigkeitsniveaus für kinematisches GNSS zusammengefasst (Mansfeld 1998, Seeber 2003).

Tab. 4: Genauigkeitslevel der kinematischen GNSS

Methoden	Std.abw.
Differentielles GPS (DGPS)	1-3 m
Smoothed Differentielles GPS (Smoothed DGPS)	0,5-1,0 m
Präzises Differentielles GPS (PDGPS)	0,01-0,1 cm
PDGPS - Float-Lösung	dm - m
Precise Point Positioning Phase (PPP Phase)	cm - dm
Precise Point Positioning Code (PPP Code)	dm - m
Wide-Area DGPS (WADGPS)	dm - m

Für eine Referenztrajektorie werden verschiedene Niveaus bezüglich der Standardabweichung von TanDEM-X definiert. Die Genauigkeitsanforderungen werden in Tab. 5 dargestellt und leiten sich aus Tab. 3 ab. Die Anforderungen an die GPS-Referenztrajektorien sind für verschiedene Faktoren, die die Genauigkeitsdifferenz zwischen TanDEM-X Anforderung und GPS-Trajektorien beschreiben, dargestellt (Ramm & Schwieger 2007).

Tab. 5: Genauigkeitsanforderungen für Referenztrajektorien

	TanDEM-X Anforderung		Anforderungen für Referenztrajektorien		
	HRTI-3	Std.abw.	Std.abw. Faktor 3	Std.abw. Faktor 5	Std.abw. Faktor 10
Abs. vert. Genauigkeit	10 m	6,10 m	2,03 m	1,22 m	0,61 m
Rel. vert. Genauigkeit	2 m (Hang < 20 %)	0,86 m	0,29 m	0,17 m	0,09 m
Horizont. Genauigkeit	10 m	4,65 m	1,55 m	0,93 m	0,47 m

Die Anforderungen in Tab. 5 sind mit den Möglichkeiten der Tab. 4 in Zusammenhang zu bringen. Letztendlich konnte der Faktor 10 nicht mit vertretbarem Aufwand erreicht werden. Es wurden zwei Genauigkeitsniveaus definiert:

- Niveau 1: Standardabweichung von 1m (ca. Faktor 5) zur Evaluierung der absoluten Genauigkeit von TanDEM-X
- Niveau 2: Standardabweichung von 0,3m (ca. Faktor 3) zur Evaluierung der relativen Genauigkeit von TanDEM-X

Zusammenfassend werden folgende verschiedene Möglichkeiten der Datenerfassung und der Evaluierung in Tab. 6 festgelegt.

Tab. 6: Genauigkeitsniveaus und alternative Datenerfassungsmethoden

	Erforderliche Std. abw.	Differential GPS	Precise Point Positioning
Niveau 1	1 m (Faktor 5)	smoothed DGPS	Code PPP
Niveau 2	0,3 m (Faktor 3)	PDGPS (Phase)	Phase PPP

Die Anwendung der DGPS-Methode erfordert eine Referenzstation oder ein Referenzstationsnetz. Die erste Variante ist ineffizient, da Zeit und Personal benötigt werden, um etwa alle 40km eine Referenzstation zu errichten. Die Zweite ist nicht weltweit verfügbar. Da eine einheitliche Evaluierung für die ganze Welt sicher gestellt werden muss, wurde die Entscheidung getroffen, die Positionen mit PPP zu evaluieren. Aus Tab. 6 ist ersichtlich, dass Code-PPP und Phasen-PPP für die Verarbeitung auf Niveau 1 bzw. Niveau 2 verfügbar sind. Da Code- und Phasendaten zur gleichen Zeit aufgenommen werden können, wenn "geodätische 2-Frequenz" Empfänger benutzt werden, wurde entschieden, nur eine Lösung zu verwenden: Die kinematische Phasen-PPP Lösung. Für weitere Ausführung zur GNSS-Auswertung mittels PPP sei auf Heßelbarth (2009) und Giese et al. (2010) verwiesen.

4 Datenerfassung

Bei der gesamten Datenerfassung wurden verschiedene Zwei-Frequenz-Empfänger verwendet. Die Antenne wird immer auf dem Dach des Fahrzeugs montiert (siehe Abb. 7).



Abb. 7: Antenne (LEICA GX 1230) auf dem Dach eines PKWs

Ein LEICA GX 1230 Empfänger und eine AX 1202 Antenne wurden für die Mehrzahl der Tracks benutzt. Für die Datengewinnung in Afrika wurden ein TOPCON Hiper GGD Empfänger und eine TOPCON PG A1 Antenne benutzt. Die Daten jedes Tracks sind in mehreren RINEX Dateien mit einer Datenrate von 10 Hz gespeichert. Die kinematischen GPS Tracks wurden weltweit gemessen. Die Daten wurden auf DVDs gespeichert und nach Übermittlung an das DFD (Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum) von dort aus an das IAGB (Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen) der Universität Stuttgart gesendet.

Bis jetzt wurden zehn Messtracks für die TanDEM-X Mission ausgewertet. Die gesamte Datenerfassung wurde in den Jahren 2008 und 2009 durchgeführt. Abb. 8 gibt einen Überblick über die verarbeiteten Messtracks.

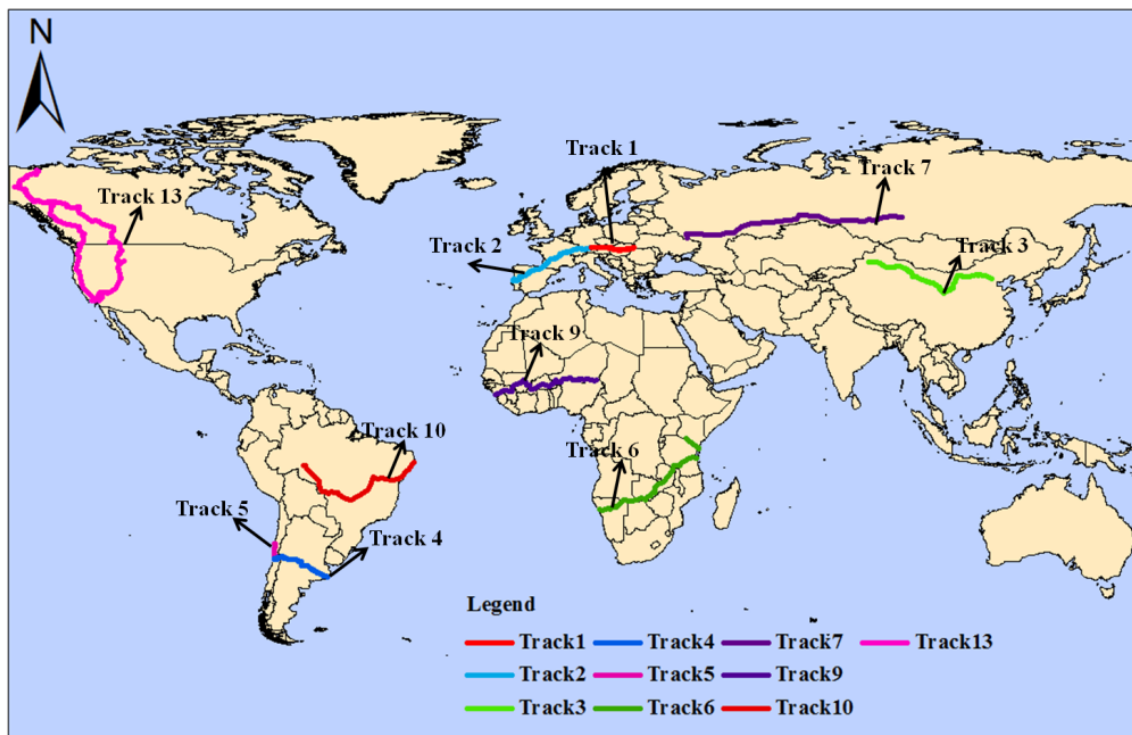


Abb. 8: : Überblick über die evaluierten GPS Tracks

Track 1 startet bei München und läuft bis an die Grenze zur Ukraine. Track 2 geht von München aus nach Sao Matinho in Portugal. Track 4 wurde von Chile nach Argentinien befahren. Track 5 befindet sich in Chile und hat die geringste Länge von ca. 589km. Diese Tracks wurden in Hin- und Rückweg befahren.

Die nachfolgenden Tracks wurden nur einmal befahren. Track 3 befindet sich in Nordchina und geht von Beijing nach Gaoquan. Track 6 und Track 9 wurden in Afrika erfasst. Im Juli 2009 wurde Track 10 in Argentinien mit LEICA GX 1230 befahren. Im August 2009 wurde Track 13 in Kanada und in den USA erfasst. Dieser Track hat mit 13.935km die größte Länge und ist in 136 Teiltracks unterteilt. Bis Ende dieses Jahres werden die verbleibenden Tracks 8, 11, 12 und 14 ausgewertet sein.

In Tab. 7 ist eine Übersicht der verschiedenen Tracks chronologisch dargestellt. Aufgeführt sind unter anderem der Zeitraum der Messaufnahme, die Länge des Tracks und die benutzten Empfänger.

Tab. 7: Überblick über die zehn ausgewerteten Tracks

Track	Position	Richtung	Start	End	Länge [km]	Empfänger
1	München - Ukraine	Hinfahrt	05/13/08	05/15/08	997	Leica GX1230
		Rückfahrt	05/15/08	05/17/08	1004	Leica GX1230
2	München - Sao Martinho	Hinfahrt	06/09/08	06/13/08	2343	Leica GX1230
		Rückfahrt	06/15/08	06/28/08	2573	Leica GX1230
3	Beijing – Gauquan	Hinfahrt	10/04/08	10/11/08	3903	Leica GX1230
4	Laguna Verde – Punta De Choros	Hinfahrt	11/21/08	11/23/08	622	Leica GX1230
		Rückfahrt	11/23/08	11/24/08	556	Leica GX1230
5	Vina Del Mar – Mar Del Plata	Hinfahrt	11/24/08	11/28/08	1715	Leica GX1230
		Rückfahrt	12/01/08	12/09/08	1811	Leica GX1230
6	Nairobi - Outjo	Hinfahrt	06/14/09	06/24/09	5230	TPS HIPER_GGD
7	Krasnojarsk - Belgorod	Hinfahrt	07/20/09	07/31/09	1657	Leica GX1230
9	Conakry - Oturkpo	Hinfahrt	07/23/09	08/03/09	4677	TPS HIPER_GGD
10	Recife - Porto Veiho	Hinfahrt	07/31/09	08/07/09	4984	TPS HIPER_LITE
13	Calgary - Los Angeles	Hinfahrt	07/01/09	08/13/09	13935	Leica GX1230

Bei der Datenerfassung wurde eng mit der FIG Commission 5 „Positioning and Measurement“ zusammengearbeitet. Auf einen von dem DLR und der FIG Commission 5 unterzeichneten weltweit verteilten Aufruf zur Teilnahm am Datenerfassungsprozess, konnten sehr viele Interessenten gefunden und auch konkrete Aufträge erteilt werden.

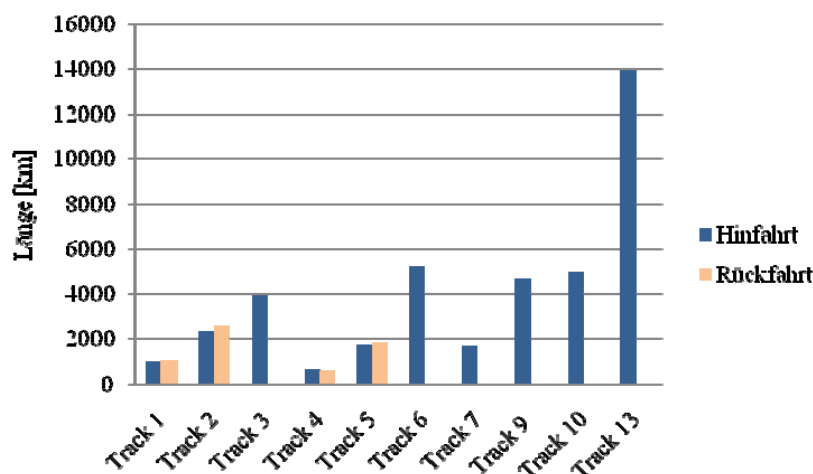


Abb. 9 Überblick über die Länge der zehn ausgewerteten Tracks

In den nächsten Kapiteln werden die Auswertung und die qualitative Bewertung dieser Tracks beschrieben und die Ergebnisse der Nachverarbeitung präsentiert.

5 Auswertung

Die Rohdaten stehen zur Auswertung im RINEX-Format (Receiver Independent Exchange Format) zur Verfügung. Da die PPP-Auswertung insbesondere für kinematische Anwendungen zum Teil noch unzuverlässige Ergebnisse bedingt, werden zwei Strategien zur Qualitätssicherung der Ergebnisse angewendet. Zum einen werden die kinematischen Ergebnisse zweimal ausgewertet und dann zusammengeführt. Die Auswertung erfolgt mit der „GPS-Inferred Positioning SYstem and Orbit Analysis SIMulation Software (GIPSY-OASIS (GOA II))“ des amerikanischen „Jet Propulsion Laboratory (JPL)“ und mit der kanadischen „Canadian Spatial Reference System (CSRS) PPP Online Service“ (CSRS, 2009) der „Natural Resources Canada“ (NRCan). Zum anderen wird eine Evaluierung der Endresultate mittels PDGPS realisiert. Daher werden vorhandene Referenzstationen in der Nähe der Messtracks ausgewählt. Die Trajektorienpunkte innerhalb eines Radius von 20km um die jeweilige Referenzstation werden evaluiert (Ramm & Schwieger, 2007).

5.1 GIPSY 5.0

Die Autoren benutzen GIPSY Version 5.0, das unter der Red Hat Linux Distribution Fedora 10 lauffähig ist (Schweitzer & Schwieger, 2008). GIPSY ist eine Kommando-Zeilen basierte Software, die unter anderem die PPP Methode unterstützt. Für die Software sind einige Dokumentationen im Internet erhältlich (<https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/gipsy/docs/>). Allerdings sind diese für den Nutzer nicht leicht verständlich. Zusätzlich können Erfahrungen, Probleme und Lösungen über das GIPSY-Forum (<https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/ubb-cgi-bin/ultimatebb.cgi>) ausgetauscht werden. Zum Teil können hier Informationen gewonnen werden. Für die Auswertung mittels Phasen-PPP ist das Script `gd2p.pl` verfügbar. Die kinematischen Positionen werden durch eine von anderen Scripts geglättete Lösung extrahiert. Die RMS der Phasendaten werden bei der Auswertung erzeugt und in Output-File (siehe Tab. 8) gespeichert.

Tab. 8: Output-File von GIPSY

	Breite	Länge	Höhe		
GIPSY					
263962494.20	48.2096541	11.4687257	549.666	1.2920 KINE	Positionsgenauigkeit
263962494.20	0.0000	0.0000	0.0000	1.2920 KINE	
263962494.20	13.4733	-1644.7706	5.811	1.2920 KINE	Differenzwerte zwischen
263962494.30	48.2097564	11.4689865	549.634	1.2920 KINE	berechneten Position und
263962494.30	0.0000	0.0000	0.0000	1.2920 KINE	Nährungswerte [m]
263962494.30	13.4663	-1648.7706	5.611	1.2920 KINE	

Zeit in [s] Verbesserungen [m]

Bei der Auswertung mit GIPSY werden die von JPL angebotenen präzisen Orbit- und Uhrenprodukte (High-Rate) für PPP verwendet. Da zwei-Frequenz Empfänger bei der Datengewinnung zum Einsatz gekommen sind, wird kein ionosphärisches Modell für die Auswertung ausgewählt. Bezüglich der Troposphäre wird neben einem Standardmodell ein zenitaler Troposphärenparameter geschätzt. Die Modellierung eines Random-Walk-Prozesses für diesen Parameter zeigte eine verschlechterte Qualität der Ergebnisse und wurde daher verworfen. Die absoluten Antennenoffsets werden für GPS Empfänger und Satelliten, elevationsabhängige Variationen des Phasenzentrums nur für GPS Empfänger und Satelliten für die Prozessierung verwendet.

Aktuell tritt ein Problem bei der Auswertung mit der GIPSY Version 5.0 auf. Es zeigt sich, dass gd2p.pl nach der Einführung neuer Orbit- und Uhren-Produkte (High-Rate) von JPL nicht mehr korrekt funktioniert. Zwei korrespondierende Updates wurden wie gefordert installiert. Trotzdem erhalten die Autoren für die ausgewerteten kinematischen Positionen immer noch große Ausreißer im 100m Bereich. Dieses gilt aber nur für Tracks, die nicht in diesem Beitrag beschrieben sind.

5.2 CSRS-Oline Service

Der CSRS-PPP Online Service ist sehr einfach zu bedienen. Die Rohdaten im RINEX Format werden ins Webinterface hochgeladen. Optionen, wie das Referenzsystem, können selektiert werden. Außerdem gibt es eine Auswahl zwischen kinematischer und statischer Verarbeitung.

Canadian Spatial Reference System

CSRS-PPP

CSRS-PPP is an on-line application for GPS data post-processing that allows GPS users to submit observation data over the Internet and recover, using precise GPS Orbit and Clock information, enhanced positioning precisions in the Canadian Spatial Reference System (CSRS) and the International Terrestrial Reference Frame (ITRF).

Select RINEX Observation File

C:\Dokumente und Einstellungen\z\ Durchsuchen...

(Name: use only Western Roman alphanumerics, including hyphen and underscore)
 (Compression: none or zip (.zip), gzip (.gz) or UNIX Compress (.Z))
 (Format: RINEX or Compact RINEX (Hatanaka))

Select Mode of Processing

Static
 Kinematic

Select Reference System

NAD83(CSRS)
 ITRF (Epoch of GPS data)

Enter/Change E-Mail to which results will be sent
 bimin.zheng@iagb.uni-stuttgart.de

START File Upload/Processing

RINEX-File hochladen

Abb. 10: CSRS Interface

Die Links zu den Resultaten einschließlich Positionen, Residuen und Verarbeitungsüberblick werden in Form einer E-Mail etwa nach ungefähr fünf bis zehn Minuten zur Verfügung gestellt.

Tab. 9: Output-File von CSRS

Breite	Länge	Höhe	Stunde	Tag des Jahres	Jahr
CSRS-PPP					
48.2661331	12.8321983	408.679	16.52808	134	2008
48.2661331	12.8321983	408.685	16.52806	134	2008
48.2661331	12.8321983	408.684	16.52802	134	2008
48.2661331	12.8321984	408.684	16.52800	134	2008
48.2661331	12.8321983	408.679	16.52797	134	2008

Für genauere Details zu den implementierten Modellen, Korrekturen und Verarbeitungsstrategien verweisen die Autoren auf Kouba & Héroux (2000).

5.3 Kombination beider Ergebnisse

Die Auswertergebnisse der beiden Systeme werden miteinander verschmolzen. Es werden dabei nur die Positionen weiterverwendet, bei denen der Höhenunterschied zwischen GIPSY Ergebnis und CSRS Ergebnis kleiner als 1m ausfällt. Dadurch können zuverlässige Ergebnisse erzielt werden, wohingegen die Verfügbarkeit reduziert wird. Das Endergebnis ist der Mittelwert der Koordinaten aus GIPSY und CSRS. Abb. 11 zeigt einen Überblick über den gesamten Auswerteprozess.

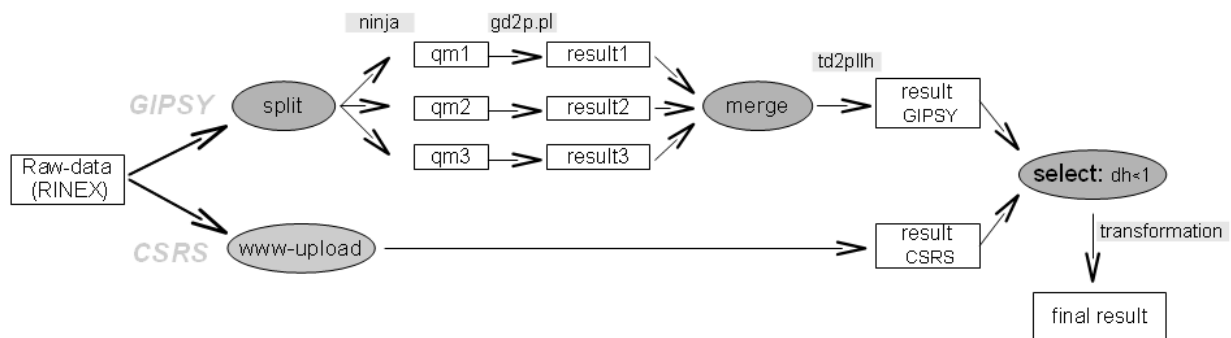


Abb. 11: Überblick über den PPP Auswerteprozess
(Schwieger et al, 2009)

5.4 Vergleich mit PDGPS

Wenn Referenzstationen in der Nähe eines Tracks (Länge der Basislinien kleiner als 20km) vorhanden sind, wird eine PDGPS Auswertung mit Leica Geo Office realisiert.

Auf diese Weise wird zum einen eine andere Auswertestrategie verfolgt und zum anderen eine andere Software verwendet. Die Ergebnisse sollten daher maximal unabhängig sein, wenn auch identische kinematische RINEX-Daten verwendet werden.

Der Referenzrahmen für die Koordinaten, die für das TanDEM-X Projekt verwendet werden, ist ITRF2005 (International Reference Frame 2005) Epoche 2010.0. Die Koordinaten, die sich aus der GIPSY und CSRS-PPP ergeben, beziehen sich beide auf den ITRF2005 der jeweiligen Messepoche. Die Koordinaten müssen also von ITRF2005 der Messepoche in die Epoche 2010.0 transformiert werden. Die Daten, auf welchen diese Veröffentlichung basiert, wurden zwischen Mai 2008 und August 2009 gewonnen. Die Veränderung von Epoche 2008.5 zur Epoche 2010.0 beträgt in Europa maximal 3cm (Schweitzer &

Schwieger, 2008). Bei der weiteren Datengewinnung (nach 2008) wird die Veränderung kleiner. Das Endergebnis ist eine Datei mit dreidimensionalen Koordinaten Länge, Breite und ellipsoidische Höhe im ITRF 2005 Epoche 2010.0.

6 Qualitative Bewertung der Ergebnisse

6.1 Qualitätsparameter

Die Qualität der Auswertungsergebnisse wird durch die Merkmale „Verfügbarkeit“ und „Genauigkeit“ der Daten beschrieben.

Die Verfügbarkeit wird durch den Parameter „Verfügbarkeitswert $A[\%]$ “ konkretisiert. Dieser beschreibt, für wie viel Prozent aller Messungen eines Tracks der Höhenunterschied zwischen GIPSY Ergebnis und CSRS Ergebnis kleiner als 1m ist (Schwieger & Schwieger 2008):

$$A[\%] = \frac{r_j}{n_j} \cdot 100 \quad (1)$$

r_j ist die Anzahl der Messungen mit Höhenunterschieden kleiner als 1m,

n_j ist die Anzahl aller Messungen,

j steht für den jeweiligen Teiltrack.

Die Verfügbarkeit wird für jeden Teiltrack berechnet. Am Ende wird das gewichtete Mittel der Verfügbarkeit $A_{sum}[\%]$ für den Gesamttrack ermittelt:

$$A_{sum}[\%] = \frac{\sum (A_j \cdot r_j)}{\sum r_j}. \quad (2)$$

Das Merkmal Genauigkeit wird durch den Parameter Standardabweichung s_j konkretisiert. Die Berechnung erfolgt nach Formel 3:

$$s_j^k = \sqrt{\frac{\sum (h_{gipsy,i} - h_{csrs,i})^2}{2r_j}}, \quad (3)$$

$h_{gipsy,i}$ ist die durch GIPSY ausgewertete Höhe für jede Epoche i ,

$h_{csrs,i}$ ist die durch CSRS ermittelte Höhe für jede Epoche i .

Am Ende wird auch hier das nach Epochenanzahl gewichtete Mittel der Standardabweichung nach Formel (4) berechnet:

$$s^k = \sqrt{\frac{\sum (s_j^k)^2 \cdot r_j}{\sum r_j}}. \quad (4)$$

Die Standardabweichung oder RMS beschreibt nur die innere Genauigkeit der kinematischen GPS Messung. Liegen ausgewertete PDGPS Messung nach Abschnitt 5.4 vor, so kann eine Evaluierungstandardabweichung nach Formel (5) berechnet werden:

$$s_j^k = \sqrt{\frac{\sum (h_{\text{gipsy-csrs},i} - h_{\text{pdgps},i})^2}{r_j}}, \quad (5)$$

$h_{\text{gipsy-csrs},i}$ ist die gemittelte Höhe aus GIPSY und CSRS für jede Epoche i ,
 $h_{\text{pdgps},i}$ ist die ausgewertete Höhe in LeicaGeoOffice für jede Epoche i ,
 r_k steht für die Anzahl der verfügbaren PDGPS-Lösungen.

Für jeden Teiltrack wird außerdem die gemittelte Höhendifferenz zwischen PDGPS und gemittelten PPP-Ergebnissen berechnet:

$$\Delta H = \frac{\sum (h_{\text{gipsy-csrs},i} - h_{\text{pdgps},i})}{r_k}. \quad (6)$$

6.2 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Qualitätsparameter und einige weitere Charakteristika wie Dauer und Punktdichte für alle Tracks vorgestellt. Es handelt sich um die nach Abschnitt 5.3 gemittelten Ergebnisse. Die PDGPS-Evaluierung wird gesondert aufgeführt.

Tab. 10: Qualitätsparameter und Charakteristika der ausgewerteten Tracks

Track	Fahrstrecke	Richtung	Epochen- anzahl	Dauer [h]	A _{sum} [%]	s [m]	Punktdichte [1/km]
1	Munich – Ukraine	Hinfahrt	375046	16,5	65,0%	0,45	376
		Rückfahrt	350577	18,4	57,0%	0,44	349
2	Munich - Sao Martinho	Hinfahrt	772685	36,2	60,0%	0,48	330
		Rückfahrt	774775	39,1	58,0%	0,48	301
3	Beijing – Gauquan	Hinfahrt	1788140	68,0	71,0%	0,48	458
4	Laguna Verde – Punta De Choros	Hinfahrt	288296	13,8	59,0%	0,50	464
		Rückfahrt	260881	12,0	58,0%	0,49	469
5	Vina Del Mar – Mar Del Plata	Hinfahrt	497312	28,9	46,0%	0,57	290
		Rückfahrt	519377	31,2	47,0%	0,51	287
6	Nairobi - Out- jo	Hinfahrt	1656912	85,6	56,0%	0,63	361
7	Krasnojarsk - Belgorod	Hinfahrt	2079222	88,0	67,0%	0,47	446
9	Conakry - Ife	Hinfahrt	1235210	70,8	53,1%	0,98	301
10	Recife – Porto Veiho	Hinfahrt	1254412	86,5	43,0%	0,54	251
13	Calgary - Los Angeles	Hinfahrt	4663817	221,6	81,4%	0,51	567
Gewichtetes Mittel					65%	0,56	422

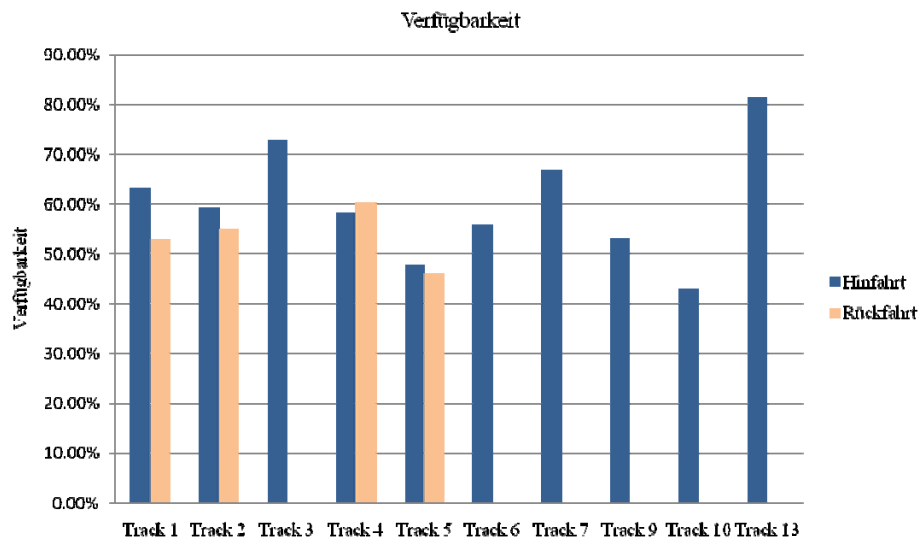


Abb. 12: Verfügbarkeit der Messungen

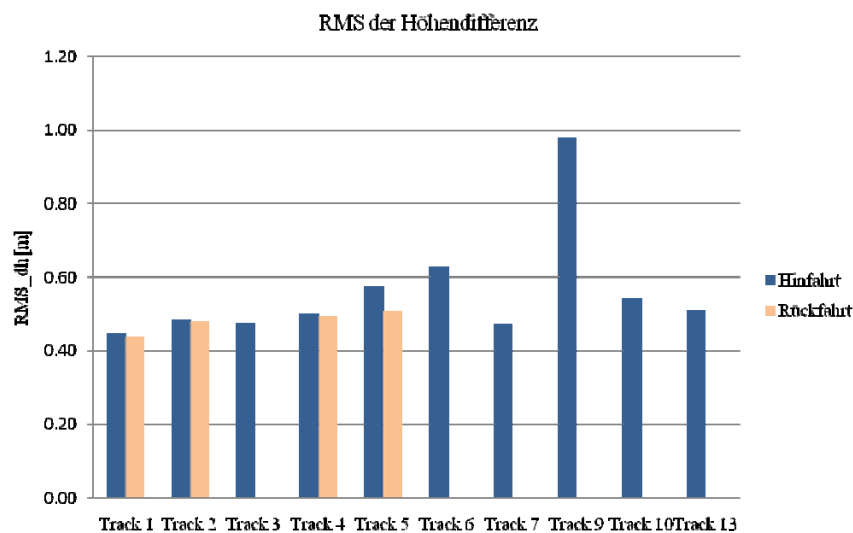


Abb. 13: Standardabweichung der Höhendifferenzen

Die Spalte „Punktdichte“ beschreibt, wie viele Punkte pro Kilometer im Mittel für einen Track zur Verfügung standen. Dieser Wert charakterisiert die räumliche Verteilung der Positionen.

Die nach Epochenanzahl gewichtete Punktdichte beträgt 422 Punkte/km, das heißt in der Fahrstrecke von 12m liegen ca. 5 Punkte. Dies erfüllt die Anforderung an die Auflösung, dass mindesten 3 Punkte jeweils innerhalb eines 12m x 12m Pixels liegen sollen (vergleiche Tabelle 3 und Ramm & Schwieger 2007).

Die Resultate von Track 13 zeigen die höchste Verfügbarkeit (siehe Abb. 12). Es wurde eine mittlere Verfügbarkeit von 81% erreicht. Dies kann durch den Umstand erklärt werden, dass die Route durch wenig bewohnte Gebiete führte, d.h. keine Tunnel, Brücken. Die Resultate von Track 10 dagegen zeigen die geringste Verfügbarkeit. Es konnte im Mittel nur ein Wert von 43% erreicht werden. Die mögliche Ursache dafür ist die schlechte Qualität der RINEX-Daten auf Grund von Satellitensignalverlusten bei der Datenerfassung. Die zwei Tracks in Europa haben ungefähr die gleiche mittlere Verfügbarkeit, jeweils 61% und 59%. Im Vergleich zu allen anderen Tracks, hat der erste Track die beste Standardabweichung mit 0.45m. Track 9 hat die schlechteste Standardabweichung mit 0,98m. Ursache hierfür sind die dichte Vegetation und die GPS-feindliche Straßenumgebung. Beides wird durch Berichte bei der Datenerfassung belegt.

Durchschnittlich ergibt sich ein Wert von 0,56m für s . Das ist weniger gut als in Ramm & Schwieger (2007) definiert. Bereits in Schwieger & Schwieger (2008) konnte der geforderte Wert von etwa 0,3m nicht erreicht werden. Für verschiedene Lösungsstrategien wurden Verfügbarkeiten zwischen 74% und 90% erreicht. Die Standardabweichungen lagen dagegen zwischen 0,68m und 0,85m. Aus diesem Grunde sollte bei der hier vorgestellten Standardauswertung eine geringere Verfügbarkeit bei verbesserter Genauigkeit erreicht werden. Das gelang, obwohl, wie zuvor geschrieben, die 0,3m nicht erreicht werden konnten. Der mit dieser Strategie erreichte Wert ist jedoch in jedem Fall besser als die erwartete DEM-Genauigkeit.

Die durch PDGPS unter Nutzung von festen Referenzstationen generierten Ergebnisse werden zur Evaluierung der PPP Resultate genutzt. Um die geforderte Genauigkeit zu garantieren, darf eine Basislinie von 20km Länge nicht überschritten werden.

Für alle Tracks außer Track 4, Track 6 und Track 9, konnten Referenzstationen identifiziert werden. Die kürzesten Distanzen zwischen Trajektorienpunkte der gesamten Tracks und Referenzstation betragen bereits mehr als 50km. Die Distanz abhängigen Fehler können die Evaluierungsergebnisse stark beeinträchtigen (Schwieger & Schwieger, 2008). Daher wurde in diesem Fall entschieden, auf die PDGPS Evaluierung zu verwenden. Die individuellen Namen der Stationen und der Qualitätsparameter sind für alle anderen Tracks in

Tab. 11 aufgeführt.

Die RINEX Dateien der Referenzstationen wurden von der offiziellen Website “The Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS, 2009)” und der Website “GNSS Data Center (GDC, 2009)” heruntergeladen. Die Stationskoordinaten der jeweiligen Epochen wurden den SINEX Dateien der CDDIS Website entnommen.

In

Tab. 11 sind sowohl die Mittelwerte der Höhendifferenzen ΔH als auch die entsprechenden Standardabweichungen S_k aufgezeigt.

Tab. 11: Ergebnisse der PDGPS-Evaluierung

Track	Referenzstation	Anzahl vom Vergleichen k	ΔH [m]	S_k [m]
1	LINZ	7	0,21	0,26
	OBE3	3	-0,51	0,53
2	OBE3	29	0,21	0,5
	SALA	35	0,18	0,37
3	URUM	99	-0,03	0,39
4	Keine Ref. Station			
5	Sant	97	0,37	0,79
6	Keine Ref. Station			
7	NVSK	41	0,39	0,15
9	Keine Ref. Station			
10	BRAZ	88	-0,16	0,24
13	TABL	52	0,06	0,39
	INVK	153	0,47	0,18
Gewichtetes Mittel			0,20	0,60

Die charakteristischen Werte ΔH und S_k zeigen zufriedenstellende Ergebnisse. Das gewichtete Mittel der ΔH beträgt 0,2m und die gewichtete S_k erreicht 0,6m. Für Track 5 ergeben sich die schlechtesten Resultate. Diese können, wie schon zuvor erwähnt, auf die komplexe Topographie in Chile und Argentinien zurückgeführt werden. Für alle Tracks zeigt die Evaluierung Genauigkeitsparameterwerte an, die der Berechnung mittels PPP entsprechen.

6.3 Problemfälle

Aufgrund von Bauwerken (wie z.B. Brücken, Tunneln), dichter Vegetation und komplexen Geländeformen (wie z.B. Gebirgszüge der Anden), kann es passieren, dass die Verbindung von der Antenne zu den Satelliten teilweise oder ganz unterbrochen wird. In solchen Fällen ist die Qualität der Datenauswertung deutlich vermindert (vergleiche Abb. 14).

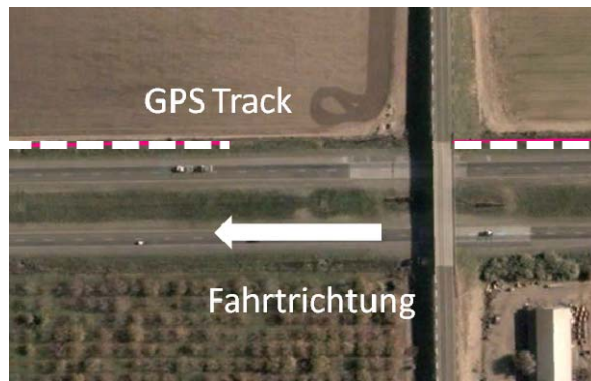


Abb. 14: Messfahrt unter Brücken

Wenn die Satelliten wieder zur Verfügung stehen, gibt es allerdings auch bei der Neuinitialisierung Probleme. Der Grund liegt in der Fixierung der Mehrdeutigkeit. Diese ist besonders schwierig, wenn nach einem Signalverlust nur Epochen mit wenigen Satelliten erfasst werden können.

Ein Sonderfall existiert bei der Auswertung und soll hier vorgestellt werden: der Teiltrack E8g von Track 13. Die Eingangsdaten für GIPSY und CSRS haben eine sehr schlechte Qualität mit vielen Datenlücken. Tatsächlich ist aber in solchen Fällen die Standardabweichung der ausgewerteten Höhe aus beiden Software noch immer gering. Abb. 15 zeigt auf, dass die gemittelten Standardabweichungen der ausgewerteten Höhen aus GIPSY und CSRS kleiner als 0,3m ausfallen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich nicht um die in Kapitel 6.1 bestimmten Standardabweichungen handelt, sondern um die internen Standardabweichungen aus den Auswertepaketen (vergleiche auch Abschnitt 6.4). Wenn die Differenzen der ausgewerteten Höhen beider Softwarepakete gebildet werden, hat fast jeder Trackpunkt eine Höhendifferenz größer als 1m. In Abb. 16 werden die Höhendifferenzen zwischen GIPSY und CSRS dargestellt. Die Ursache der ungewöhnlichen zwei-gipfligen Verteilung ist den Autoren momentan noch nicht klar. Vertiefende Untersuchung werde in der Zukunft mit dem Problem beschäftigen.

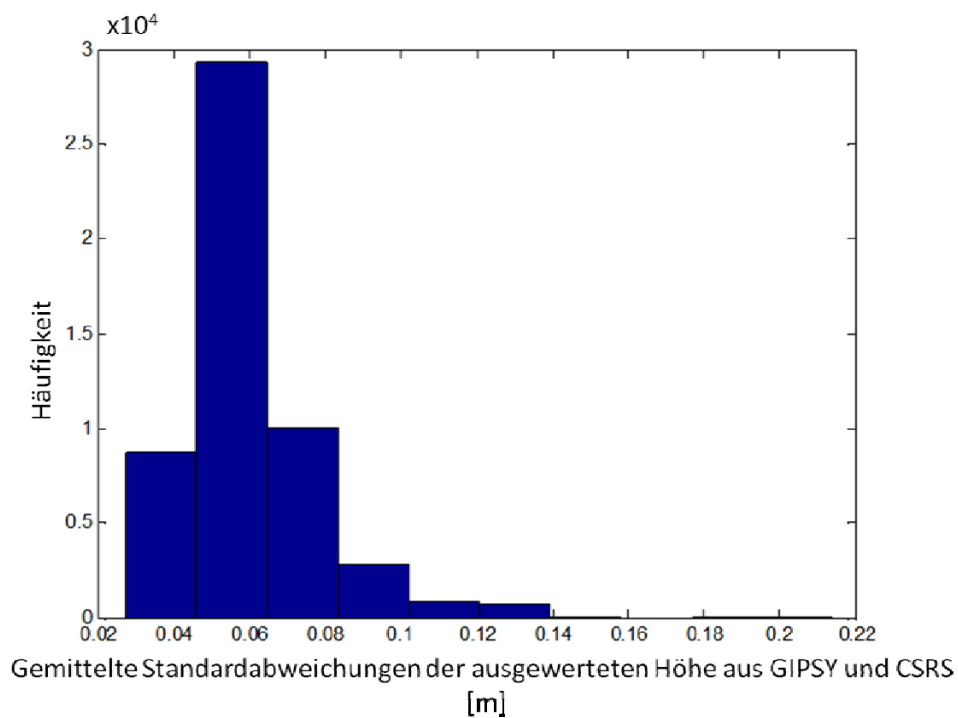


Abb. 15 Histogramm der gemittelte Standardabweichungen der ausgewerteten Höhe aus GIPSY und CSRS (Track 13 E8g)

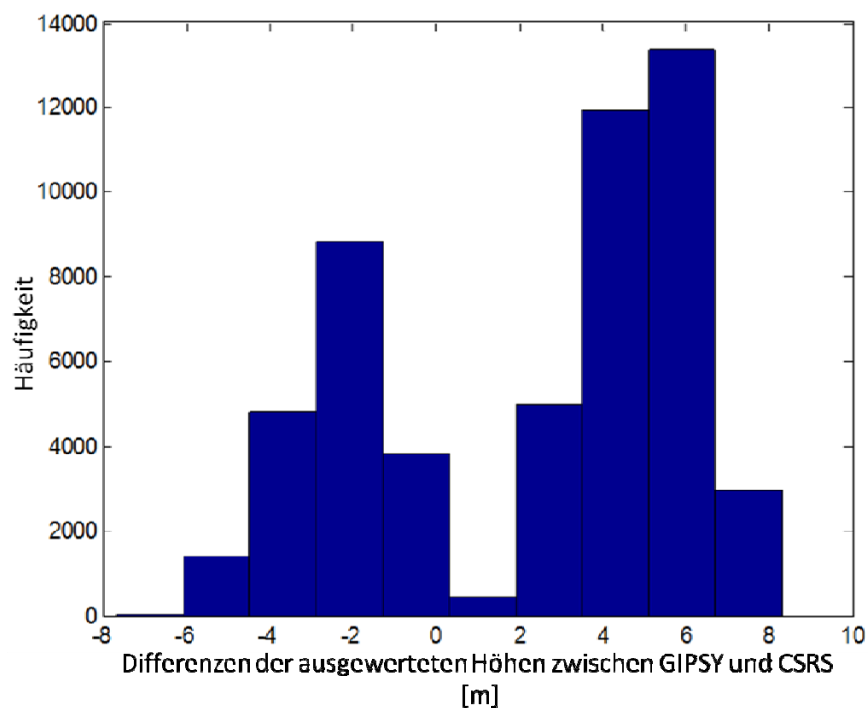


Abb. 16: Höhedifferenzen zwischen GIPSY und CSRS(Track 13 E8g)

6.4 Indikatoren für die qualitative Bewertung

In diesem Unterkapitel wird die interne Genauigkeit der zwei Systeme GIPSY und CSRS-PPP analysiert. Beide stellen jeweils eine Positionsgenauigkeit für jede Epoche, σ_{3D} genannt, zur Verfügung. Diese parametrisieren die innere Genauigkeit der Messung. Sie dürfen nicht mit den s_k , die im Unterkapitel 6.1 erwähnt wurden, verwechselt werden.

In diesem Abschnitt wird die Korrelation zwischen den internen Genauigkeiten und den Höhendifferenzen zwischen GIPSY und CSRS herausgearbeitet. Die Positionen werden nur für die Epochen berechnet, deren Höhendifferenzen unter 1m liegen. Diese Positionen werden als „gefiltert“ bezeichnet. Die Positionen, die nicht im Endergebnis berücksichtigt wurden, werden als „verworfen“ bezeichnet. In Tab. 12 sind die mittleren σ_{3D} und die jeweiligen Standardabweichungen angezeigt. Sie sind in gefilterte Ergebnisse und verworfene Ergebnisse der beiden Softwaresysteme untergliedert. Wenn also eine Korrelation existiert, sollten die verworfenen Ergebnisse eine schlechtere interne Genauigkeit aufweisen als die gefilterten Ergebnisse.

Tab. 12: Innere Genauigkeiten von GIPSY und CSRS

in cm		GIPSY gefiltert		GIPSY verworfen		CSRS gefiltert		CSRS verworfen		
Mess- strecke	Teil- strecke	Mittel σ_{3D}	$Stdv_{\sigma_{3D}}$	Mittel σ_{3D}	$Stdv_{\sigma_{3D}}$	Mittel σ_{3D}	$Stdv_{\sigma_{3D}}$	Mittel σ_{3D}	$Stdv_{\sigma_{3D}}$	verfüg.
3	1	13	6	19	28	10	5	13	20	71%
	2	10	4	11	5	8	3	10	6	84%
	3	12	7	27	40	21	17	46	70	69%
	4	8	4	11	10	6	4	7	5	55%
	5	4	1	5	5	6	1	7	3	65%
	6	6	3	28	24	11	8	108	50	80%
2	1	19	10	148	130	25	13	55	43	45%
	2	24	12	28	25	81	75	258	270	48%
	3	23	13	31	29	43	34	95	109	53%
	4	21	12	29	32	36	29	105	204	74%
	5	14	13	27	47	20	50	54	246	70%
	6	21	12	41	45	33	20	73	83	57%
Gewichtetes Mittel		14	8	30	32	23	20	65	89	-----

Aus den nach der Verfügbarkeit gewichteten Mittelwerten ist deutlich zu sehen, dass der Unterschied von $Mittel_{\sigma_{3D}}$ zwischen gefilterten und verworfenen Positionen bei CSRS größer als bei GIPSY ist. Wie erwartet, haben die verworfenen

Epochen generell eine schlechtere Standardabweichung σ_{3D} als die gefilterten Epochen.

Die Differenz zwischen gefilterten und verworfenen Ergebnissen ist nicht immer deutlich sichtbar. Für die Teiltracks 02 und 05 des Tracks 3 beträgt der Unterschied zwischen gefilterten und verworfenen Ergebnissen nur 1cm, wohingegen für die Teiltracks 01 und 02 des Tracks 2, der Unterschied mehr als 1m beträgt.

Der Trend ist offensichtlich, aber die Korrelation zwischen den internen Genauigkeiten und den Höhendifferenzen ist nicht immer gegeben. Diese Aussage wird durch die Grafiken in Abb. 17 bekräftigt. Die obere Grafik zeigt einen Auszug aus Teiltrack 01 des Tracks 2 bezüglich der Höhendifferenz dh . Auch sind die entsprechenden internen Genauigkeiten von GIPSY und CSRS aufgeführt. Aus der oberen Grafik ist eine klare Korrelation zwischen internen Genauigkeiten und Höhengenaugigkeit dh sichtbar. In der unteren Grafik jedoch steigt dh insgesamt kontinuierlich an, von 0,4m auf 1,6m, während die internen Genauigkeiten jeweils auf 0,05m und 0,1m verharren. Die Grafiken zeigen, dass das interne Genauigkeitsmaß ein Indikator für eine tatsächliche Genauigkeitsänderung sein kann. Die untere Grafik zeigt jedoch, dass dies nicht immer der Fall sein muss.

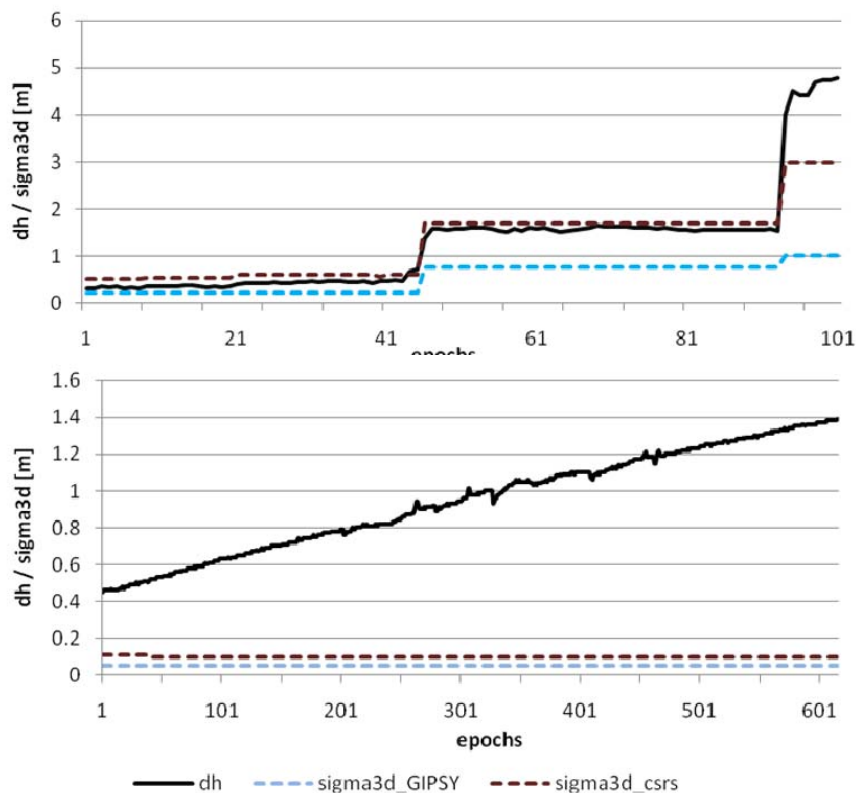


Abb. 17: Korrelation zwischen Höhendifferenz und internen Genauigkeiten

Zum Abschluss kann gesagt werden, dass die internen Genauigkeiten nicht als Filterkriterien benutzt werden können. Die Werte sind zu optimistisch. Zum Beispiel erreicht σ_{3D} von Track 3 ungefähr 10cm für GIPSY und ungefähr 11cm für CSRS. Im Gegensatz dazu beträgt die Standardabweichung s zwischen den zwei Tracks 0,48m. Dies zeigt deutlich, dass die internen Genauigkeitsmaße nicht der Realität entsprechen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Veröffentlichung wurden Zwischenergebnisse der TanDEM-X Evaluierungsmethode „kinematische GPS Tracks“ vorgestellt. Die Ergebnisse beruhen auf der Auswertung von zehn Tracks. Die mittlere Standardabweichung erreicht 0.56m und die mittlere Verfügbarkeit beträgt 65%. Diese Werte bestätigen die Ergebnisse von Schwieger et al. (2009), Schweitzer et al. (2010) und Fernandes et al. (2010). Generell liegt die Verfügbarkeit im Bereich zwischen 43% und 81%. Außer beim Track 9 liegen die Standardabweichungen der Höhendifferenzen zwischen GIPSY und CSRS im Bereich von 0,44m bis 0,63m.

Die Ergebnisse wie auch die Verarbeitungsprozedur selbst wurden durch PDGPS Messungen zu umliegenden IGS Stationen verifiziert. Die resultierenden Standardabweichungen sind auf dem gleichen Niveau wie die endgültigen PPP Standardabweichungen. Dies gilt für jeden einzelnen Track.

Darüber hinaus haben die Autoren untersucht, ob eine Beziehung zwischen den internen Genauigkeitsmaßen, die von den Softwarepaketen GIPSY oder CSRS geliefert werden, und den endgültigen Höhendifferenzen zwischen den Ergebnissen von GIPSY und CSRS besteht. Die Korrelation zwischen Genauigkeitsmaßen und den Höhendifferenzen war in vielen Fällen offensichtlich. Dies gilt jedoch nicht für alle Daten.

Zukünftig werden die Daten weiterer Tracks aus Indien, Kanada und Australien ausgearbeitet werden. Schlussendlich werden die Ergebnisse aller Tracks verfügbar sein. Die Autoren sind optimistisch, dass sich die Genauigkeit und die Verfügbarkeit nicht signifikant ändern werden. Wenn die Datenerfassung und Auswertung abgeschlossen ist, kann das TanDEM-X Höhenmodell zuverlässig mit Hilfe von weltweiten kinematischen GPS Track evaluiert werden.

Literatur

- BISNATH S., GAO Y. (2008): Current State of Precise Point Positioning and Future Prospects and Limitations. International Association of Geodesy Symposia, Vol. 133 pp. 615-623.
- CDDIS: The Crustal Dynamics Data Information System. <http://cddis.gsfc.nasa.gov/>. last acces April 2009.
- CSRS: Canadian Spatial Reference System. http://www.geod.nrcan.gc.ca/index_e.php, last access August 2009.
- FERNANDES, R.M.S., SANTOS, J. M.F., KOSMANN, D. (2010): Merging GNSS Kinematic Tracks – Using the TanDEM-X Mission in Africa, FIG Kongress, Sydney, Australien.
- GDC: GNSS Data Center. <http://igs.bkg.bund.de>, last acces April 2009.
- GIESE, M., KACZKOWSKI, J., LANGE, A., STIEGERT, C., WIEGRATZ, J., ZAKRZEWSKI, P., WANNINGER, L. (2010): Berechnungsdienste für Precise Point Positioning (PPP). GNSS 2010, 100. DVW-Seminar, Wißner-Verlag, Augsburg.
- GRUBER, A., WESSEL, B., HUBER M. (2009): Tandem-X DEM Calibration: Correction of systematic DEM Errors by Block Adjustment. International Geo Science and Remote Sensing Symposium, Kapstadt, Südafrika, 12.07.-17.07.2009.
- HÉROUX, P., GAO, Y., KOUBA, J., LAHAYE, F., MIREAULT, Y., COLLINS, P., MACLEOD, K., TÉTREAU, P., CHEN, K. (2004): Products and Applications for Precise Point Positioning – Moving Towards Real-Time. Proceedings of ION GNSS 2004, Long Beach, CA, pp. 1832-1843.
- HEßELBARTH, A. (2009): GNSS-Auswertung mittels Precise Point Positioning (PPP). Beitrag zum 83. DVW-Seminar "GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen", 18.- 19.03.2009, Dresden. DVW-Schriftenreihe, Band 57/2009, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 187-202.
- HUBER, M., WESSEL, B., KOSMANN, D., FELBIER, A., SCHWIEGER, V., HABERMAYER, M., WENDLEDER, A., ROTH, A. (2009): Ensuring globally the TanDEM-X height accuracy: Analysis of the reference data sets ICE-Sat, SRTM and KGPS-Tracks. International Geo Science and Remote Sensing Symposium, Kapstadt, Südafrika, 12.07.-17.07.2009.
- IGS: IGS Products. <http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>, last access July 2009.
- KOSMANN, D., WESSEL, B., SCHWIEGER, V. (2010): Global Digital Elevation Model from TanDEM-X and the Calibration/Validation with worldwide kinematic GPS-Tracks.

- MANSFELD, W. (1998): Satellitenortung und Navigation. Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden.
- RAMM, K., SCHWIEGER, V. (2007): Requirements on Kinematic GPS-Measurements for the Evaluation of Height Accuracy within the TanDEM-X Project, DLR TanDEM-X Ground Segment Document TD-PGS-TN-3061.
- RODRIGUEZ, E., MORRIS, C.S. BELZ, J.E., CHAPIN, E.C., MARTIN, J.M., DAFFER, W., HENSLEY, S. (2005): An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.
- SCHWEITZER, J., SCHWIEGER, V. (2008): Kinematic GPS processing of the Track Munich-Ukraine (unveröffentlicht).
- SCHWEITZER, J., ZHENG, B., SCHWIEGER, V., KOSMANN, D. (2010): Evaluation of the TanDEM-X Digital Elevation Model by PPP GPS - Analysis and Intermediate Results, FIG Kongress 2010, Sydney, Australien.
- SCHWIEGER, V., SCHWEITZER, J., KOSMANN, D. (2009): GPS Precise Point Positioning as a Method to Evaluate Global TanDEM-X Digital Elevation Model. 7th FIG Regional Conference, Hanoi, Vietnam, 19th-22th October 2009.
- SCHWIEGER, V., SCHWIEGER, I. (2008): Evaluation of Exemplary Kinematic GPS-Measurements Using Different Methods, DLR TanDEM-X Ground Segment Document TD-PGS-TN-3097.
- SEEBER, G. (2003): Satellite Geodesy. Walter de Gruyter, Berlin.